

Определение погрешности измерения радиуса кривизны сферического вогнутого зеркала с помощью лазерного дальномера

А.А. Сахаров¹, И.В. Животовский¹, В.Е. Карасик¹, А.А. Патрикеева¹

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Аннотация

Представлены прибор и методика расчета погрешностей измерения радиусов кривизны оптических деталей с помощью лазерного дальномера. Показано влияние погрешностей юстировки прибора с датчика волнового фронта на измерение радиусов зеркал. Приведены расчеты погрешностей методики измерения радиуса дальномером.

Проведенный компьютерный анализ показал, что разработанная схема учета рассогласования позволяет оценить точность измерения радиуса зеркала на уровне относительной погрешности 0,02–0,3% для зеркал с радиусами от 1 до 10 м. Обоснован выбор точностных характеристик используемых дальномеров для задач определения радиуса кривизны оптических деталей.

Ключевые слова: погрешность измерения, сферическое зеркало, датчик Шака–Гартмана, датчик волнового фронта, радиус кривизны, лазерный дальномер, измерение дальности, расчет рассогласования.

Цитирование: Сахаров, А.А. Определение погрешности измерения радиуса кривизны сферического вогнутого зеркала с помощью лазерного дальномера / А.А. Сахаров, И.В. Животовский, В.Е. Карасик, А.А. Патрикеева // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 2. – С. 246–250. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1197.

Citation: Sakharov AA, Zhivotovsky IV, Karasik VE, Patrikeeva AA. Determining the error in measuring the spherical concave mirror radius of curvature with a laser rangefinder. Computer Optics 2023; 47(2): 246–250. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1197.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили измерительные приборы с датчиками волнового фронта (ДВФ) [1].

Основным измеряемым параметром для ДВФ является радиус кривизны волнового фронта, который может использоваться как для определения расстояния до источника излучения, так и для измерения кривизны поверхности оптических деталей [2–6].

Для измерения больших расстояний (радиусов кривизн волнового фронта) ДВФ необходима калибровка с помощью высокоточного лазерного дальномера, поскольку известные методики измерения радиуса кривизны достаточно трудоемки [7, 8] и занимают большое количество времени, а следовательно, для оперативного контроля такие способы не подходят.

Схема измерения радиуса кривизны волнового фронта представлена в статье. С помощью такого способа использования ДВФ появляется возможность не только измерения расстояния до центра источника сферического волнового фронта, но и измерения радиуса кривизны оптических деталей [9].

Сравнение различных методов измерения радиусов кривизн зеркал по точности и трудоемкости приведено в [7, 9].

Так как приборы с ДВФ имеют особенности определения центра кривизны волнового фронта [10], то вопрос точности совмещения луча лазерного даль-

мера с этим центром требует более детального рассмотрения.

Учитывая эти особенности прибора с ДВФ, в статье анализируются погрешности измерения расстояний (радиуса кривизны волнового фронта и оптической детали) с использованием лазерного дальномера при неколлинеарном расположении измерительного канала.

В качестве высокоточного эталона расстояния при калибровке в приведенной схеме необходимо использовать зеркальную поверхность известного радиуса.

Таким образом, установив с помощью эталонного зеркала фиксированный радиус кривизны волнового фронта, приходящего на датчик Шака–Гартмана, можно, используя лазерный дальномер, определить его радиус.

1. Описание способа измерения радиуса кривизны лазерным дальномером

Упрощенная схема прибора для измерения радиуса сферического зеркала с помощью лазерного дальномера [9] представлена на рис. 1. Оптическая ось дальномера 1 перпендикулярна оси измеряемого зеркала 4. Для направления луча на сферическое зеркало используется плоское зеркало 3, которое устанавливается таким образом, чтобы луч лазерного дальномера проходил через центр кривизны зеркала.

Определение положения центра кривизны измеряемого зеркала осуществляется с помощью прибора с датчиком волнового фронта, подробнее это будет

описано в следующем параграфе. На рис. 1 приведена только необходимая для иллюстрации принципа измерения часть прибора с ДВФ – фокусирующая насадка 2, фокус которой должен быть совмещен с центром кривизны зеркала. Это совмещение, соответствующее автоколлимационному ходу лучей, контролируется с помощью ДВФ.

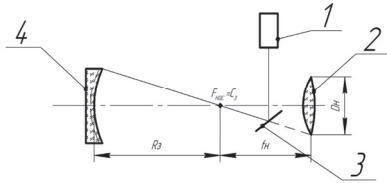


Рис. 1. Схема прибора для измерения радиуса вогнутого сферического зеркала с помощью лазерного дальномера

Радиус зеркала можно определить, если из расстояния, определенного дальномером (рис. 1), вычесть расстояние от дальномера до центра кривизны зеркала 4. Чтобы вычислить последнее расстояние, можно воспользоваться эталонным зеркалом (с известным радиусом кривизны), что позволит оставить измерительную схему без изменений и без дополнительных элементов. Такая схема для удобства расчетов представлена на рис. 2, где эталонное зеркало отмечено номером 5.

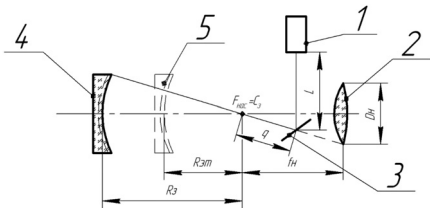


Рис. 2. Схема измерения с использованием эталонного зеркала

В этом случае сначала измеряется расстояние до эталонного зеркала, затем оно убирается и измеряется расстояние до исследуемого зеркала. Тогда радиус исследуемого зеркала рассчитывается по следующей формуле:

$$R_z = D_z - D_{эт} + R_{эт}, \tag{1}$$

где $D_z = L + q + R_z$ – расстояние до исследуемого зеркала, измеренное дальномером; $D_{эт} = L + q + R_{эт}$ – расстояние до эталонного зеркала, измеренное дальномером. В таком случае q и L отдельно не измеряются, значит, они никак не вносят погрешности, а погрешность определяется только погрешностью измерения $R_{эт}$.

Однако в реальной системе возникает некоторая непредвиденная погрешность [10], выявленная на этапе юстировки, вклад которой в результат измерения и будет рассматриваться в данной работе.

2. Схема начальной юстировки прибора

Как уже говорилось ранее, для измерения радиуса зеркала предложенным методом необходимо знать

положение его центра кривизны. Для этого можно использовать собранный на кафедре РЛ2 прибор с датчиком волнового фронта, схема которого приведена на рис. 3.

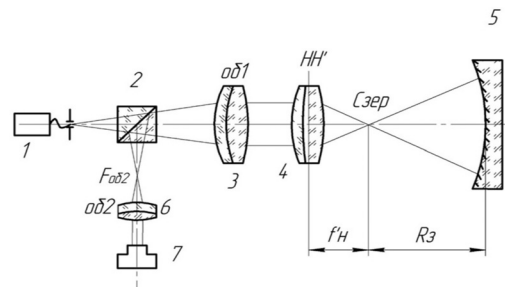


Рис. 3. Схема согласования центра кривизны исследуемого зеркала и фокуса насадки

Прибор включает в себя точечный источник излучения 1, формируемый полупроводниковым лазером с волоконным выходом, светоделительный куб 2, афокальную систему, состоящую из первого объектива 3 и второго объектива 6, фокусирующей насадки 4 и датчика волнового фронта 7. Измеряемой деталью является вогнутое сферическое зеркало 5. Источник излучения устанавливается в фокусе объектива 1, то есть волновой фронт после объектива 1 будет плоским. Далее излучение проходит через фокусирующую насадку, после чего оно будет сфокусировано в заднем фокусе насадки. Отраженное от зеркала излучение, пройдя через насадку, объектив 1 и частично отразившись светоделителем, попадает в передний фокус первого объектива 3. Пройдя второй объектив 6, излучение попадает на ДВФ. При совмещении центра кривизны зеркала с задним фокусом насадки формируется автоколлимационный ход лучей, контролируемый по плоскому волновому фронту, пришедшему на ДВФ. То есть зеркало, установленное на высокоточной подвижке, необходимо передвигать вдоль оси до тех пор, пока на ДВФ не будет зафиксирована гартманограмма, соответствующая плоскому волновому фронту.

3. Причины возникновения погрешности

На самом деле экспериментально было установлено [7, 10], что плоский волновой фронт приходит на датчик не при идеальном совмещении центра кривизны зеркала и фокуса насадки, а при некотором их рассогласовании $\Delta r_{асс}$, т.е. центр кривизны волнового фронта, пришедшего в прибор, не совпадает с фокусом насадки 4. На практике величину рассогласования с высокой точностью измерить и, как следствие, учесть невозможно, кроме того, для разных зеркал она не будет постоянной. Указанное рассогласование возникает вследствие следующих факторов:

- 1) абберационной каустики реальных оптических компонентов;
- 2) каустики лазерного пучка (параметр конфокальности);

3) погрешности юстировки оптических компонентов (увеличивающей абберационную каустику).

Если учитывать наличие такого рассогласования, использование формулы 1 для расчета радиуса кривизны зеркала будет давать большую погрешность. Чтобы ее определить и исключить, необходимо пересмотреть схему 1 с учетом наличия рассогласования (рис. 4).

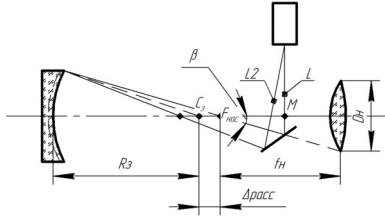


Рис. 4. Схема прибора с учетом рассогласования

Из схемы видно, что путь луча до исследуемого объекта и путь отраженного луча не совпадают. Для расчета погрешности необходимо рассчитать эти два расстояния и затем их разницу. Расстояния до зеркала $L1$ и $L2$ можно считать равными в силу их малости относительно расстояний от зеркала до объекта.

4. Расчет погрешности

Для расчета путей лучей будем использовать следующие исходные данные:

- $D_H = 50$ мм – диаметр фокусирующей насадки;
- $f_H = 500$ мм – переднее фокусное расстояние насадки;
- $R_z = 1000 \dots 10000$ мм – диапазон радиусов измеряемых зеркал;
- $\Delta_{расс} = 2 \dots 5$ мм – диапазон возможных значений рассогласования.

Для удобства расчетов будет использована схема, представленная на рис. 5.

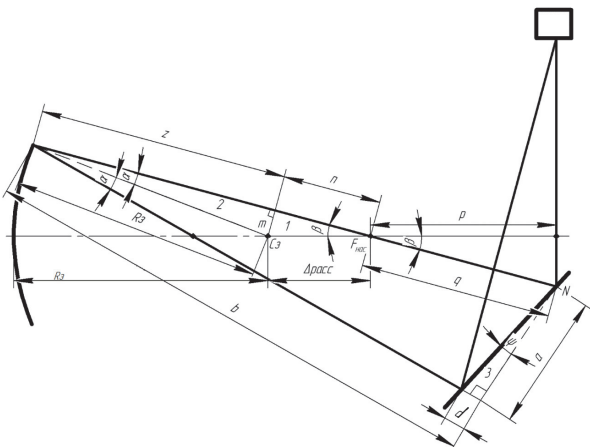


Рис. 5. Подробная схема для определения погрешности

Для определения путей лучей в первую очередь необходимо рассчитать угол между падающим и отраженным лучом 2α .

Отталкиваясь от известных данных, начнем расчет с определения угла β , который является апертурным углом фокусирующей насадки 4 (рис. 3).

$$\operatorname{tg} \beta = (D_H / 2) / f_H = 0,05 \Rightarrow \beta = 2,8^\circ. \quad (2)$$

Для расчетов проведем перпендикуляр из точки C_3 . Рассмотрим треугольник 1:

$$m = \Delta_{расс} \cdot \sin \beta = 0,048 \cdot \Delta_{расс}. \quad (3)$$

Теперь рассмотрим треугольник 2.

$$n\alpha = m / R_z = (0,048 \cdot \Delta_{расс}) / R_z. \quad (4)$$

Остальные тригонометрические функции легко получить, используя основные формулы тригонометрии.

Путь луча до зеркала $S1 = L1 + D1$, после отражения от зеркала $S2 = D2 + L2$.

Так как можем найти $D1$ следующим образом:

$$D1 = q + n + z, \quad (5)$$

где $n = \cos \beta \cdot \Delta_{расс} = 0,998 \cdot \Delta_{расс}$, $q = p / \cos \beta = 100,2$ мм, а $p = 100$ мм (из конструктивных соображений реального прибора), $z = \cos \alpha \cdot R_z$.

Проведем из точки N перпендикуляр к $D2$, тогда $D2 = b - c$. Причем $b = D1 \cdot \cos 2\alpha$, а для нахождения c рассмотрим треугольник 3:

$$\operatorname{tg} \psi = c / a, \quad (6)$$

где

$$a = D1 \cdot \sin 2\alpha = D1 \cdot 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha, \\ \psi = (90 - 2\alpha) - 46,4 = 43,6 - 2\alpha.$$

Из треугольника со сторонами p и q можно найти угол нормали к зеркалу в точке N как половину оставшегося угла этого треугольника (43,6 градуса). Тогда угол, дополняющий ψ до $90 - 2\alpha$, это будет угол 46,4 градуса.

Тогда получим следующее выражение для нахождения d :

$$d = ((0,95 - \operatorname{tg} 2\alpha) \cdot a) / (1 - 0,95 \operatorname{tg} 2\alpha). \quad (7)$$

Погрешность будет определяться разностью путей падающего и отраженного лучей и будет зависеть от R_z и $\Delta_{расс}$:

$$f(\Delta_{расс}, R_z) = D1 - D2 = q + n + z - b + d. \quad (8)$$

С помощью среды MathCad построено семейство графиков $f(\Delta_{расс})$ для 10 различных значений R_z из заданного диапазона. Эти графики приведены на рис. 6.

Действительно, зависимость (8) имеет нелинейный вид, но если ограничить $\Delta_{расс}$ до реально наблюдаемых величин (до 5 мм), то можно увидеть, что она практически линейна и одинакова для большого диапазона R_z (рис. 7).

По графику можно сделать вывод, что в указанном диапазоне $\Delta_{расс}$ и R_z погрешность, то есть разница между падающим и отраженными лучами, составляет 0,195...0,483 мм в зависимости от $\Delta_{расс}$ и R_z . То есть для определения радиуса зеркал фор-

мулой 1 необходимо учитывать наличие разности хода лучей.

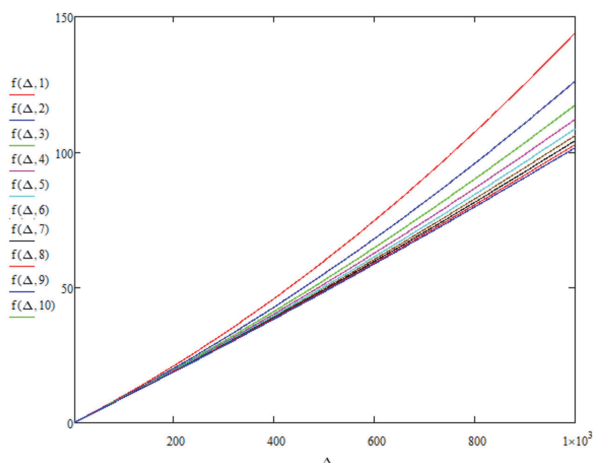


Рис. 6. График зависимости погрешности от Δ

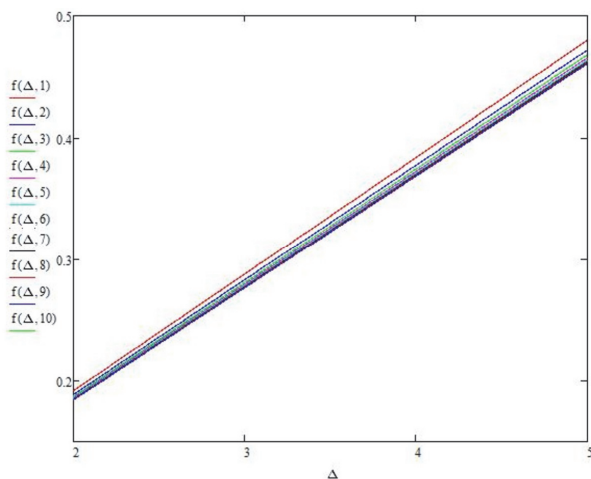


Рис. 7. График зависимости погрешности от Δ для заданного диапазона

Заключение

В ходе работы было определено, что использование лазерных дальномеров перспективно в развитии приборов определения параметров оптических поверхностей, в частности, для определения радиусов кривизны вогнутых сферических зеркал. Было показано, что при значительном [10] (до 5 мм) рассогласовании между фокусом насадки прибора с ДВФ и центром кривизны волнового фронта, приходящего в прибор, и диапазоне радиусов измеряемых зеркал от 1 до 10 м погрешность определения расстояния до зеркала не превышает 0,5 мм.

подавляющее большинство представленных на современном рынке фазовых дальномеров (например, [11]) имеет погрешность определения расстояния не лучше 1 мм. При их использовании можно не учитывать погрешности юстировки прибора, и при расчетах вполне допустимо использовать формулу (1). В этом случае относительная погрешность определения радиуса кривизны составит 0,1 – 1 % для зеркал с указанными выше радиусами.

Современные научные разработки позволяют получить точность определения расстояния 0,2–0,3 мм для фазовых дальномеров, что в совокупности с высокоточными методами юстировки [9] снизит погрешность измерения радиусов кривизны зеркал до величины 0,02–0,3 %. Для зеркал, используемых в астрономических телескопах, радиус кривизны может достигать 50 м, а поскольку точность его измерения, как показано выше, полностью определяется погрешностью используемого дальномера, то относительная погрешность для этих зеркал может достигать 0,004 %.

Стоит отметить, что современные дальномеры [11] могут измерять дальность не только по зеркальному или световозвращающему объекту, но и по диффузно-отражающей поверхности, что существенно расширяет возможные области применения рассмотренного выше метода измерения радиусов оптических деталей. Так можно проводить измерения радиусов зеркал еще на стадии шлифования, что весьма актуально для зеркал астрономических телескопов, шлифование и полировка которых занимает большое количество времени. В самом деле, ИК-интерферометр или ИК-ДВФ [12] при использовании в схеме рис. 2 способны определить положение центра кривизны измеряемого зеркала, т.к. размер шероховатостей шлифованной поверхности заметно меньше их рабочей длины волны.

Еще одной областью применения дальномерного способа измерения радиуса кривизны зеркал можно считать измерение такового у оптических деталей с осевым отверстием, где прочие способы могут оказаться вовсе не работоспособными.

Таким образом, оценка влияния погрешностей юстировки, рассмотренных в работе, становится актуальной задачей.

References

- [1] Baryshnikov NV, Denisov DG, Karasik VE, Kudryashov AV, Nikitin AN, Sakharov AA. High-precision method for control of curvature radii of optical surfaces [In Russian]. *Izvestia Vysshih Uchebnyh Zavedenii: Priborostroenie* 2016; 59(12): 1034-1042.
- [2] Nikitin A, Sheldakova J, Kudryashov A, et al. Hartmannometer versus Fizeau Interferometer: advantages and drawbacks. *Proc SPIE* 2015; 9369: 936905. DOI: 10.1117/12.2085263.
- [3] Nikitin A, Sheldakova J, Kudryashov A, et al. A device based on the Shack-Hartmann wave front sensor for testing wide aperture optics. *Proc SPIE* 2016; 9754: 97540K. DOI: 10.1117/12.221928.
- [4] Southwell W. Wave-front estimation from wave-front slope measurements. *J Opt Soc Am* 1980; 70(8): 998-1006.
- [5] Nikitin A, Baryshnikov N, Denisov D, et al. Comparative analysis of methods and optical-electronic equipment to control the shape parameters of spherical mirrors. *Proc SPIE* 2018; 10539: 105390Z. DOI: 10.1117/12.2297078.
- [6] Artzner G. Aspherical wavefront measurements: Shack-Hartmann numerical and practical experiments. *Pure Appl Opt* 1998; 7(3): 435. DOI: 10.1088/0963-9659/7/3/005.

- [7] Sakharov AA, Piskunov TS, Baryshnikov NV, Zhivotovskii IV, Mukhina EE, Vyazovych MV. Investigation of the possibility of measuring the radius of mirrors with instruments equipped with wavefront sensors. *Optics and Spectroscopy* 2019; 127(4): 647-655.
- [8] Neal DR, Copland RJ, Neal DA, Topa DM, Riera P. Measurement of lens focal length using multi-curvature analysis of Shack-Hartmann wavefront data. *Proc SPIE* 2004; 5523: 243-255.
- [9] Baryshnikov NV, Denisov DG, Zhivotovskij IV, Karasik VE, Mukhina EE, Sakharov AA, Sokolovskij VA. Method for determining radius of curvature of concave optical spherical surface with central axial hole by optical ranging method. Pat RF of Invent N 2695085 of July 19, 2019.
- [10] Trubitsina EV, Zhivotovsky IV, Sakharov AA. Adjustment of device with a wavefront sensor using accuracy characteristics of the sensor [In Russian]. *Kontenant* 2019; 3: 51-63.
- [11] Leica Disto products Wavemaster. Source: <https://leica-geosystems.com/products/disto-and-leica-lino/leica-disto>.
- [12] ShaH Wavefront sensors. Source: <http://visionica.ru/shah.htm>.

Сведения об авторах

Сахаров Алексей Александрович, 1969 года рождения, в 1992 году окончил Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. Работает ведущим инженером в МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико-электронных систем. Область научных интересов: адаптивные оптические системы. E-mail: smx@bmstu.ru.

Животовский Илья Вадимович, 1975 года рождения, в 2000 году окончил Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. Работает доцентом кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ имени Н.Э. Баумана. Область научных интересов: лазерная локация, световозвращающие системы, системы автоюстировки. E-mail: ivj@bmstu.ru.

Карасик Валерий Ефимович, 1939 года рождения, окончил Московское высшее техническое училище имени Н.Э. Баумана. Работает директором НОЦ «Фотоника и ИК-техника» при МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: лазерные системы и устройства. E-mail: karassik@bmstu.ru.

Патрикеева Анастасия Андреевна, 1996 года рождения, в 2013 году окончила Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. Работает инженером в МГТУ имени Н.Э. Баумана на кафедре лазерных и оптико-электронных систем. Область научных интересов: адаптивная оптика, изображенияющие системы. E-mail: patrikeeva@bmstu.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 22 июля 2022 г. Окончательный вариант – 28 сентября 2022 г.

Determining the error in measuring the spherical concave mirror radius of curvature with a laser rangefinder

A.A. Sakharov¹, I.V. Zhivotovsky¹, V.E. Karasik¹, A.A. Patrikeeva¹

¹ Bauman Moscow State Technical University,
105005, Moscow, Russia, 2nd Baumanskaya st., 5, building 1

Abstract

An instrument and technique for assessing errors of measuring optical surface radius of curvature with a laser rangefinder are presented. Errors of optical instrument alignment with a wavefront sensor are shown to influence the accuracy of measuring the mirror radius. Errors of the rangefinder-aided technique for measuring the surface radius are estimated. A computer analysis shows that the developed scheme of misalignment measurement allows a relative error of 0.02 – 0.3 % to be attained for mirrors ranging in radius from 1 m to 10 m. The choice of the accuracy characteristics of the rangefinders used for measuring the optical surface radius of curvature is justified.

Keywords: measurement error, spherical mirror, Shack-Hartmann sensor, wavefront sensor, radius of curvature, laser rangefinder, range measurement, misalignment calculation.

Citation: Sakharov AA, Zhivotovsky IV, Karasik VE, Patrikeeva AA. Determining the error in measuring the spherical concave mirror radius of curvature with a laser rangefinder. *Computer Optics* 2023; 47(2): 246-250. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1197.

Authors' information

Alexey Alexandrovich Sakharov, (b. 1969), graduated from the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Works as a leading engineer at Moscow State Technical University named after N.E. Bauman at the Laser and Optoelectronic Systems department. Research interests: adaptive optical systems. E-mail: smx@bmstu.ru.

Ilya Vadimovich Zhivotovsky, (b. 1975), graduated from the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Works as an assistant professor at the Laser and Optoelectronic Systems department of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Research interests: laser location, retroreflective systems, auto-adjustment systems. E-mail: ivj@bmstu.ru.

Valery Efimovich Karasik, (b. 1939), graduated from the Moscow Higher Technical School named after N.E. Bauman. Works as director of the REC "Photonics and IR-techniques" at the Moscow State Technical University. N.E. Bauman. Research interests: laser systems and devices. E-mail: karassik@bmstu.ru.

Anastasia Andreevna Patrikeeva, (b. 1996), graduated from the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Works as an engineer at the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman at the Laser and Optoelectronic Systems department. Research interests: adaptive optics, imaging systems. E-mail: patrikeeva@bmstu.ru.

Received July 22, 2022. The final version – September 28, 2022.
